

基于蚁群算法与海量 AIS 数据的船舶航线规划*

姚肖肖 胡勤友[▲] 杨 春

(上海海事大学商船学院 上海 201306)

摘 要:利用船舶 AIS 轨迹数据,研究了基于蚁群算法和海量 AIS 数据的航线规划方法。采用 Douglas-Peucker 算法对海量轨迹数据进行压缩处理;基于 DBSCAN 算法对处理后的 AIS 轨迹点数据进行聚类,提取出航路关键转向点;依据地理边界数据确定关键转向点的连接关系,并对靠近孤立碍航物的航线进行修正,构建出 1 个无向网络图,同时计算出各条边的船舶航行密度;将各边的密度值作为 MMAS 蚁群算法的初始信息素浓度,求解港口间的最优安全航线。以 2017 年黑德兰港到青岛港的散货船 AIS 轨迹数据为样本,进行航线规划研究。结果表明,规划的航线总航程为 3 487.21 n mile,推荐航线总里程为 3 576.9 n mile,传统蚁群算法规划出的航线总里程为 3 560.42 n mile。与相关推荐航线相比总航程缩短约为 3%,与传统蚁群算法相比总航程缩短约 2%;另外该方法相较于传统蚁群算法收敛速度更快。

关键词:交通规划;航线规划;蚁群算法;AIS;DBSCAN

中图分类号:U697.33 **文献标志码:**A **doi:**10.3963/j.issn.1674-4861.2019.03.010

Route Planning of Vessels with Ant Colony Algorithm and Massive AIS Data

YAO Xiaoxiao HU Qinyou[▲] YANG Chun

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai, 201306, China)

Abstract: Based on AIS trajectory data of the vessels, a method for route planning with ant colony algorithm and massive AIS data is developed. The trajectory data is compressed by Douglas-Peucker algorithm. Then DBSCAN algorithm is used to process AIS trajectory points and extract key turning points. According to geographic boundary data, a connection relationship of the key turning points is determined. The routes are amended when a vessel is close to isolated obstacles. An undirected network graph is developed to calculate navigation density of each edge. The density is taken as the initial pheromone concentration of MMAS ant colony algorithm to calculate the optimal safety route between ports. Taking AIS trajectory data of bulk carriers from Hedland Port to Qingdao Port in 2017 as a case study, a route planning is carried out. The results show that the total distance of planned route is 3 487.21 n mile, while recommended route is 3 576.9 n mile, and the total distance of traditional ant colony algorithm is 3 560.42 n mile. Compared with the recommended routes and routes of traditional ant colony algorithm, the total distance of this method is shortened about 3% and 2%, respectively. In addition, this method converges faster than traditional ant colony algorithm.

Key words: transportation planning; route planning; ant colony algorithm; AIS; DBSCAN

0 引 言

计划航线对船舶的安全航行起到至关重要的作用。船舶开航前,都应根据本航次的具体任务

和船舶性能规划出合理的计划航线。进行航线规划时,通常要参考《Ocean Passage for the World》《Sailing Direction》等相关航海图书资料,设计出 1 条安全、经济的航线,经船长审核后执行。航线

收稿日期:2018-10-31

*上海市科委重点项目(15590501600)资助

第一作者简介:姚肖肖(1991—),硕士研究生,研究方向:智能船舶与海事信息处理。E-mail: yaoxiaoxiaofy@163.com

▲通信作者:胡勤友(1974—),博士,教授,研究方向:智能船舶与海事信息处理。E-mail: qyhu@shmtu.edu.cn

设计的过程中,一般会按照《世界大洋航路》上给出的推荐航线进行航线设计,在航经部分特殊海域时,船员会依靠航行经验,对其进行修改。随着E-航海的快速发展,计划航线的自动规划成为1个热点问题,国内外许多专家学者都对其展开了一系列研究。

吕超等^[1]基于《中国航路指南》中的推荐航线转向点进行统计分析,确定转向点之间的关系建立沿海转向点关系库,采用A*算法求取静态航路网络中的最短航路。转向点数据来源于航海图书资料,需要大量人工数据统计。陈晓等^[2]采用Maklink图构建碍航物的多边形边界,构建航路网络。利用Dijkstra算法生成最短路径,然后基于蚁群算法对该路径作进行优化。该方法要对海洋环境建模若可航范围较大,则效率偏低。徐言民等^[3]提出基于分层思想的路径规划算法,对航路规划空间进行分层,简化环境模型,构建路径规划的目标函数,使用逆向逐步搜索路径优化优化方法进行航线设计。范云生等^[4]通过提取电子海图中的海洋环境信息数据,建立栅格模型,采用遗传算法搜寻最优航路。该方法需要对海洋环境进行栅格化编码,若栅格过大,则精度较差,栅格过小,则需要较多计算资源。Song等^[5]对海洋环境进行栅格化后,采用改进的蚁群算法进行无人水面艇的全局路径规划。该方法对于实际航行情况并没有充分考虑。Szlapczynski^[6]根据路径规划理论进行最优航线的设计,该方法对单位格点进行搜索,找到的航线一般不是最短的。王佳莹等^[7]采用连续型Hopfield神经网络算法航线进行优化设计,综合考虑航线运价以及路程作的约束条件,设计最优航线。王牧^[8]将气象定线技术与船舶数据相结合进行航线规划,该方法需要大量测绘数据,实际推广困难。KANG等^[9]基于滚动时域的启发式遗传搜索算法求解最优航线。WU等^[10]将海洋动态信息应用于航线可行性分析,在此基础上求解最短时间航线。KIM等^[11]提出了一种在网格化地图中基于有限角速率的航路规划方法。Zhang等^[12]基于AIS轨迹数据转向点,根据船舶轨迹确定转向点的连通性,构建有向航路网,利用蚁群算法进行船舶航线的规划。

相关研究仍存在以下问题:①对推荐的转向点建立关系库,进行最短航线的设计与传统航线规划方法区别较小,并未考虑实际情况;②实际生产过程中,海洋环境复杂且多化,对海洋环境进

行网格化建模较为困难,致使其适用性较差;③需要大量精确的测绘数据,难以满足要求。基于以上背景,针对海上交通进行分析、研究,探索一种不需要依靠对海洋环境进行精细建模,能在复杂航行环境下快速、准确的完成最优航线设计的方法显得尤为重要。

为克服上述问题,本文结合海量AIS轨迹数据与蚁群算法。从AIS数据中提取关键转向点,构建无向航路网络,以降低环境建模的难度。利用蚁群算法,规划出1条安全,经济的船舶航线。

1 算法流程

船舶AIS数据包含大量船舶航迹,其中凝结着许多航海人员的航行经验和船舶的习惯航线。利用海量AIS数据进行船舶的航线规划具有可行性。

首先对海量AIS轨迹数据进行轨迹压缩,删除大量冗余轨迹数据点,然后对处理后的船舶AIS数据进行聚类分析,获取聚集频率较高的簇,计算每一聚类簇的平均值作为关键转向点;对关键转向点进行全连接,构建无向网络图,依据电子海图中的地理边界数据,判断图中与陆地、岛屿、碍航物相交的线段,并对其进行删除或修正,形成无向航路网络;计算每1条航路的船舶通航频率;归一化处理后的通航频率值表示大量船舶的航行习惯,频率较大的航路代表船舶经常航行的航线。将各航路通航频率赋值为MMAS蚁群算法的初始信息素浓度,进行安全、经济航路的规划。相关定义如下。

关键转向点:使用聚类算法对AIS轨迹进行聚类,计算聚类簇的均值点。

无向航路网络:对所有转向点进行全连接,剔除所有与陆地、岛屿边界相交的航路,对经过碍航物的航路进行优化。

通航频率:对航线每侧各扩展500m形成缓冲区,计算单位面积上轨迹点的数目。

航线规划的流程见图1。

2 船舶AIS数据预处理

船舶轨迹是一系列点的集合,每个点都有1个时间戳。因为由于各种因素的影响,轨迹数据中不可避免地会出现一些错误,因此需要对数据进行预处理。对AIS数据进行预处理的主要程序包括以下步骤^[13]。

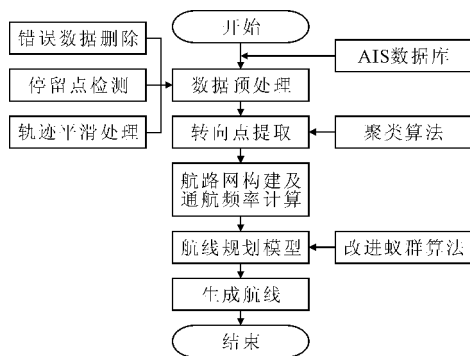


图1 算法流程

Fig.1 Algorithm flow

1) 删除错误数据。如 MMSI 位数小于 9 位的记录;纬度大于 90° 或小于 -90° 的记录;经度大于 180° 或小于 -180° 的记录。

2) 检测停留点。如船舶位于泊位、锚地等地时的 AIS 记录。对其进行检测并删除。

3) 平滑化处理轨迹。如连续的轨迹点经纬度某点发生突变,这里采用中值滤波算法进行处理。

4) 海量轨迹数据压缩处理。由于船舶 AIS 动态信息的报告间隔为 $2\sim 180\text{ s}$ 之间,在 AIS 原始轨迹数据中存在大量冗余数据。为在保证处理精度的前提下降低数据分析量,对原始轨迹数据进行适当的压缩。剔除其中的重复和冗余数据,保留能够体现船舶运动特性的数据。这里采用 Douglas-Peucker 算法。

3 转向点提取

3.1 关键转向点提取

某一水域一段时间内的船舶航迹分布情况,不仅可以反映出该区域的航路特点,还可以间接反映出船舶的频率,交通流量的大小等信息。航迹分布图的表达方式一般分为 2 种方式。

1) 轨迹点位置分布图,即将船舶轨迹点按时间序列在地图上绘制出来。

2) 轨迹线分布图,即将船舶轨迹点按时间顺序进行连接起来所形成的轨迹线。

对船舶的轨迹进行分析可发现,绝大部分的转弯点都发生在转向点附近,因此,只要找到所有轨迹中的转弯点,就有可能使用聚类的方法找到所有的转向点。

对于船舶的航线而言,其中存在一些必经点,这里称之为关键转向点。使用聚类算法进行转向点聚类。然后对每一聚类簇取平均值,做为代表性转向点。为使聚类形成的簇和噪声点的表现更

加直观,这里采用轨迹点位置分布图。

3.2 聚类算法选择

聚类算法的种类很多,如基于划分方法的聚类、层次聚类,网格聚类,频率聚类等。对聚类算法的选择主要考虑如下 4 点。

1) 对于船舶轨迹数据的分布没有任何先验经验,转弯点的数量也不清楚,这需要所选的算法能够自动确定类簇的数量。

2) 转弯点多分布在转向点附近,这要求每个聚类簇的形状类似于圆形。

3) 每个聚类的尺寸不应太大,太大可能覆盖多个转弯点。

4) 任意 2 个聚类中心距离不应太近,实际情况中相邻较近的转向点较少。

基于以上 4 点,DBSCAN(density-based spatial clustering of applications with noise)算法能够满足这些条件。该算法利用密度的概念,对聚类空间中的数据按照一定约束条件(即在给定的距离范围内所包含的点数不小于给定的阈值)进行分类,将具有相同特征的数据划为 1 个簇。该算法将频率足够大的相邻区域相连接,能够发现任意形状的聚类簇以及噪声数据。

4 无向航路网络构建

航路网络是进行航线规划的基础。这一阶段采用方法为利用已获得的转向点进行航路网络的构建,无需对所航海域进行环境建模。具体方法如下。

依据关键转向点,对其进行全连接,构建航路网络 $G=(V,E)$ 。其中: V 转向点集; E 为边集。以全球水域的陆地、岛屿边界数据为依据,判断航路 E 是否与陆地、岛屿边界相交。若航路 E 与陆地、岛屿边界线段相交则定义为无效航路,否则定义为有效航路。然后计算每一条有效航路船舶通行频率。对于经过暗礁、沉船等孤立点碍航物的航路,对其进行修正^[15],由此构建出安全无向航路网络。修正方法如下。

见图 2,某航线为 $ABDE$ 。若检测出有碍航物 C ,则以 C 为圆心,以 2 n mile 为半径做圆。离危险物 2 边最近的关键点(B 点和 D 点)对圆做切线得到切线 BG 和切线 DH ,将切线的交点 F 定义为新的关键转向点。连接新的关键转向点生成新的航路 $ABFDE$ 。

由于航路网络是一系列的线状要素,各航路

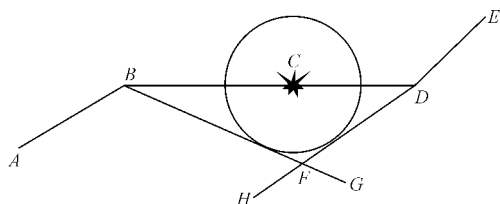


图2 航路修正

Fig. 2 route correction

船舶的通航频率可简化为计算各航路轨迹点密度,采用线状要素缓冲区分析的方法进行航路轨迹点密度计算^[16]。缓冲区是给定空间对象或集合的邻域。邻域的大小由邻域的半径或者缓冲区构建的条件确定^[17]。因此对于1个给定的对象A,其缓冲区可以定义为

$$P = \{x \mid d(x, A) \leq r\} \quad (1)$$

式中: d 为欧式距离; r 为邻域半径或缓冲区建立的条件。

分析各航路上轨迹点的数目,计算各航路上船舶轨迹点的数量及该航路的面积。则有效航路的船舶通行频率计算见式(2)~(3)。

$$n_i = \sum_{j=1}^m n_j^i \quad (2)$$

$$\rho_i = \frac{n_i}{S_i} \quad (3)$$

式中: n_i 为航路 i 上的轨迹点数; m 为船舶的数目; i 为可航航路的数目; ρ_i 为航路 i 上的轨迹点频率; S_i 为航路 i 的面积。

5 航线规划数学模型

航线规划的目的是在港口之间规划出1条安全、经济的最优航线(总航程最短)。结合海上实际情况,需要对船舶航向、航程航行经验(航线上的信息素浓度)等变量做出约束^[14]。并在解空间中求出最优解。综合考虑,建立船舶航线规划抽象模型见式(4)。

$$R(E_i) = E[S, P, \theta] \quad (4)$$

式中: S 为路径的距离; P 为路径的信息素浓度; θ 为转向角; $E[S, P, \theta]$ 为根据这3个因素建立的路径选择决策模型; $R(E_i)$ 为船舶根据路径通行频率规划出的航线。该模型的目标就是要求得1条路径尽量短,转向角尽量小,通行频率尽量高的路径。

路径的距离和信息素浓度的具体计算公式分别见式(5)~(7)。

$$S = \min \sum_{i=1}^n S(E_i) = \min [S(e_1) + S(e_2) + \cdots + S(e_n)] \quad (5)$$

$$P = \max \sum_{i=1}^n p(e_i) \quad (6)$$

$$\theta(i) = \left(\frac{e \cdot e_{i+1}}{|e_i| \cdot |e_{i+1}|} \right) \leq 90^\circ$$

$$\theta = \sum \min [\theta(e_1) + \theta(e_2) + \theta(e_3) + \cdots + \theta(e_n)] \quad (7)$$

对可航路径的距离、通行频率,以及转向角进行综合考虑后,制定的决策函数为

$$W = \min(w_1 S + w_2 \frac{1}{P} + w_3 \theta) \quad (8)$$

式中: S, P, θ 分别为其标准化后的值; w_1, w_2, w_3 分别为 S, P, θ 的权重; θ 为转向角; e_i, e_{i+1} 分别为相邻的第 i 和 $i+1$ 条边。

根据蚁群算法的正反馈原理和局部搜索特性,在上述决策函数的约束下,制定合适的正反馈策略使蚂蚁在解空间内寻求到最优解。利用构建的无向航路网络,赋予其不均衡的初始“先验”经验,以加快算法的收敛速度。为扩大蚁群算法的全局搜索能力,适当扩充蚁群的数量。设蚁群的蚂蚁数量为 $M+N$ 只, N 只蚂蚁赋予航路网络初始信息素,另外 M 只为新加入的蚁群。在循环迭代过程中若 M 只蚂蚁发现更优航路,则参与信息素的更新。对于位于 e_i 边的蚂蚁,选择相邻边 e_{i+1} 的转移概率函数为

$$P_{e_i \rightarrow e_{i+1}}(a) = \begin{cases} \frac{[\tau_a(e_{i+1})]^\alpha [\eta(e_{i+1})]^\beta}{\sum_{x \in B_k} [\tau_a(e_x)]^\alpha [\eta(e_x)]^\beta}, & x \in B_k \\ 0, & x \notin B_k \end{cases} \quad (9)$$

式中 $P_{e_i \rightarrow e_{i+1}}(a)$ 为在第 a 次迭代中蚂蚁由路径 e_i 转移到 e_{i+1} 的转移概率; B_k 为蚂蚁可选择航路集; $\tau_a(e_{i+1})$ 为 e_{i+1} 边上第 a 次迭代时的信息素; $\eta(e_{i+1})$ 为边集第 $i+1$ 条边欧氏距离的倒数; α, β 分别为信息启发因子和期望因子。为避免某条路径上信息素浓度过高诱使蚂蚁聚集到某条路径上,本文使用的信息素更新策略为最大最小蚂蚁系统(MMAS)^[18]。为了充分利用每一代的爬行经验,只对每一代的最优路径更新信息素浓度。避免蚁群算法陷入局部最优化,需要将信息素浓度限 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 之间,当 $\tau_{ij} < \tau_{\min}$ 时, $\tau_{ij} = \tau_{\min}$;当 $\tau_{ij} > \tau_{\max}$ 时, $\tau_{ij} = \tau_{\max}$ 。当 $M+N$ 只人工蚂蚁完成1次航路搜索时对整条路径的信息素更新策略为

$$\begin{cases} \tau_{a+1}(E_i) = (1 - \rho) \tau_a(E_i) \\ \tau_{a+1}(E_i) = \tau_a(E_i) + \Delta \tau_{a \text{ best}}(E_i) \\ \Delta \tau_{a \text{ best}}(E_i) = 1 / \text{len}_{\text{best}}(E_i) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\rho \in (0, 1]$ 为信息素挥发因子; $\tau_a(E_i)$ 为人工蚂蚁在本次路径搜索过程中留在航路上的信息素值; $\Delta\tau_a, best(E_i)$ 为在第 a 轮迭代产生的最优路径的长度。

6 实例分析

本文以 2017 年黑德兰港到青岛港的 85 艘船长大于 200 m 的散货船 AIS 轨迹数据为样本。该批船舶原始数据包含 4 154 687 个数据点, 设置阈值为 400 m。经上述步骤处理后得到的船舶轨迹数据点为 19 655 个, 其中无效数据和冗余数据的占比约为 99.52%。处理前后的局部轨迹数据对比见图 3。由图 3(b) 可见, 处理过后的轨迹数据保持原始轨迹数据的整体骨架特征, 可以较为准确的代表原始轨迹数据。

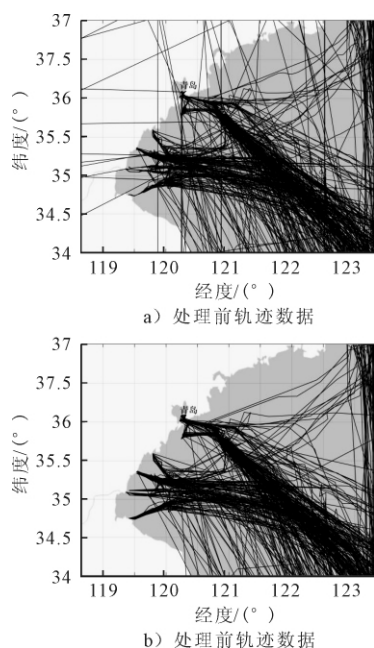


图 3 轨迹数据预处理前后对比图
Fig. 3 Comparison chart of trajectory data before and after preprocessing

以预处理后的数据为实验数据, 图 4 给出了轨迹数据的聚类簇和代表性转向点数据在聚类簇中的具体位置。其中“o”型代表噪声点数据; “*”代表聚类簇数据; “*”字标记代表提取的关键转向点。对比发现, 代表性转向点基本都位于聚类簇的簇几何中心位置。另外部分聚类簇较大, 出现代表性转向点过少的现象。其中海外区域的 AIS 数据来源为 AIS 卫星数据, 其数据量与国内沿海 AIS 数据相比较少, 有些区域会出现无数据的情况, 因此会出现部分区域出现空白的情况。但总体能够反应出航行海域的船舶主航路。

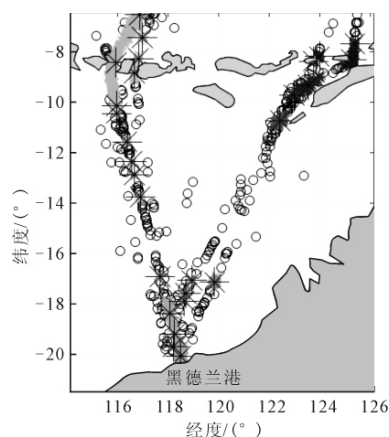


图 4 轨迹数据聚类簇及提取转向点在聚类簇中的位置
Fig. 4 Cluster of trajectory data and location of turning point in cluster

实验共获取关键性转向点 117 个, 可航航路 627 段。在 MATLAB2016a 环境下, 进行船舶航路网络构建和基于通航频率的路径规划实验。航线规划的起点为黑德兰港; 终点为青岛港。

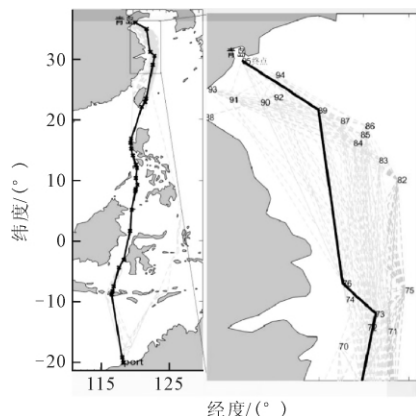
6.1 结果分析

黑德兰港与青岛港之间的航路见图 5(a), 该航线是基于构建的无向航路网络计算出的最优计划航线。图 5(b) 为网站推荐的黑德兰港到青岛港计划航线。将 2 条计划航线对比发现, 其总体走向结构基本一致, 部分局部航路存在差异。从图 5(a) 可看出, 计算出的计划航线转向点比推荐航线少。其中, 长江口以北水域图 5(a) 中矩形标注区域几乎没有转向点, 造成这一现象的原因可能是: 该区域属于南北大通道, 大部分船舶航向转向角幅度较小, 在轨迹压缩过程中被剔除了。相对于计划航线, 推荐航线在该海域有几次转向过程。尽管计算出的计划航线相较于网站推荐航线具有较少的转向点, 但算法仍能保证航线的安全可靠。

将计算出的计划航线航程与推荐航线航程以及传统蚁群算法求得的最短航程比较, 对比结果见图 6。使用蚁群算法规划出的航线总航程与航程估算网站给出的数据相比节省了 89.7 n mile (约为总航程的 3%), 与传统蚁群算法求得的最短航程相比节省了 73 n mile (约为总航程的 2%), 因此, 蚁群算法规划的计划航线具有一定优势。另外, 航线的缩短不仅可以节省船舶油耗, 而且可以减少各种废弃物的排放, 随着各种限排令不断实施生效, 该措施具有一定意义。

6.2 算法效率分析

将本文方法与传统蚁群算法进行对比, 实验



(a) 蚁群算法计算出的航线及局部细节



(b) 推荐航线及局部细节

图5 推荐航线及航程对比

Fig. 5 Recommended routes and mileage comparisons

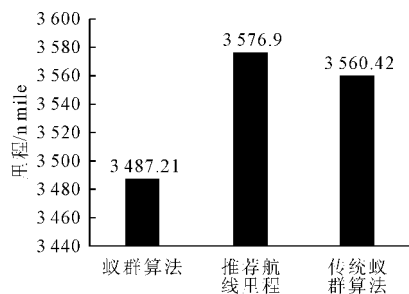


图6 航程对比

Fig. 6 Mileage comparison

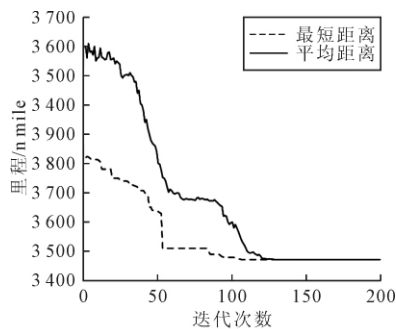
对比结果见图7。由图7可知,蚁群赋予航路网络初始信息素的蚁群算法收敛速度大幅提高。关于最短距离和平均距离的定义如下。

最短距离:在蚁群算法的整个搜索过程中,每一代搜索到的所有可行路径中最短的1条路径的距离。

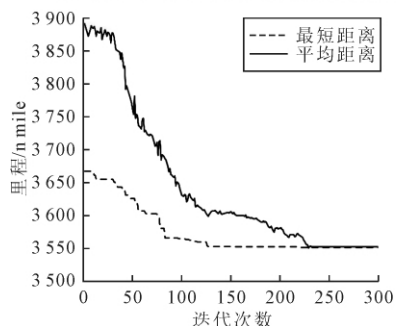
平均距离:在蚁群算法的整个搜索过程中,每一代搜索到的所有可行路径的平均距离。

7 结束语

本文对海量 AIS 数据进行分析,在构建无向航路网络的基础上,使用 MMAS 蚁群算法进行船舶航线规划。并以真实船舶 AIS 数据进行实



(a) 赋予不均衡初始信息素的迭代搜索图



(b) 赋予均衡初始信息素的迭代搜索图

图7 收敛速度对比

Fig. 7 Convergence rate comparison

验。结果表明基于该方法可快速规划出安全、经济的计划航线。

相较于其他航线规划方法,本文所提方法,无需进行复杂的环境建模,可以简化计算步骤;与已有的利用蚁群算法进行航线规划的方法相比,本文的独特之处在于带有不均衡经验分布的航路网络的构建,该步骤不仅能够加快算法的收敛速度,还可以使得充分利用大量船舶的航行经验。另外本文所提方法在转向点的提取方面有待改进,使得提取的转向点分布更加符合实际航线规划的情况。对于船舶在航路上航行过程中遇到的临时禁航区、台风等情况并未涉及,这是今后需要解决的问题。

参考文献

References

- [1] 吕超,胡勤友,向哲,等. 中国沿海主要港口推荐航线算法及其实现[J]. 上海海事大学学报, 2015, 36(3): 20-23.
LYU Chao, HU Qinyou, XIANG Zhe, et al. Route recommendation algorithm and its implementation for Chinese major coastal ports [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2015, 36(3): 20-23. (in Chinese)
- [2] 陈晓,戴冉,陈昌源. 基于 Maklink 图和蚁群算法

- 的航线规划[J]. 中国航海, 2017, 40(3): 9-13.
- CHEN Xiao, DAI Ran, CHEN Changyuan. Navigation route planning with maklink graph and ant colony algorithm[J]. Navigation of China, 2017, 40(3): 9-13. (in Chinese)
- [3] 徐言民, 昌 政, 赵俊超, 等. 基于分层思想的 AUV 路径规划算法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(6): 5-9.
- XU Yanmin, CHANG Zheng, ZHAO Junchao, et al. Study on AUV path planning algorithm based on spatial stratification[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2018, 42(6): 5-9. (in Chinese)
- [4] 范云生, 赵永生, 石林龙, 等. 基于电子海图栅格化的无人水面艇全局路径规划[J]. 中国航海, 2017, 40(1): 47-52.
- FAN Yunsheng, ZHAO Yongsheng, SHI Linlong, et al. Global path planning for unmanned surface vehicle based on grid model of electronic chart[J]. Navigation of China, 2017, 40(1): 47-52. (in Chinese)
- [5] SONG C H. Global path planning method for USV system based on improved ant colony algorithm[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014(568-570): 785-788.
- [6] SZLAPCZYNSKI R. A New method of ship routing on raster grids, with turn penalties and collision avoidance[J]. Journal of Navigation, 2006, 59(1): 27-42.
- [7] 王佳莹, 谢溪凌, 陈定方. 基于 Hopfield 神经网络算法的航线优化研究[J]. 南昌工程学院学报, 2017, 36(4): 90-94.
- WANG Jiaying, XIE Xiling, CHEN Dingfang. Shipping route optimization research based on hopfield neural network algorithm[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2017, 36(4): 90-94. (in Chinese)
- [8] 王 牧. 电子海图系统中最优航线设计的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2000.
- WANG Mu. Study on optimal route design in electronic chart system[D]. Dalian: Da Lian Maritime University, 2000. (in Chinese)
- [9] KANG M H. Development of a maritime transportation planning support system for car carriers based on genetic algorithm [J]. Applied Intelligence, 2012, 36(3): 585-604.
- [10] WU L, WEN Y, WU D, et al. Safe-economical route model of a ship to avoid tropical cyclones using dynamic forecast environment [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences Discussions, 2014, 2(8): 1857-1893.
- [11] KIM H, KIM D, SHIN J U, et al. Angular rate-constrained path planning algorithm for unmanned surface vehicles [J]. Ocean Engineering, 2014, 84(4): 37-44.
- [12] ZHANG S K, SHI G Y, LIU Z J, et al. Data-driven based automatic maritime routing from massive AIS trajectories in the face of disparity [J]. Ocean Engineering, 2018, 155: 240-250.
- [13] ZHENG Y. Trajectory data mining: An overview [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2015, 6(3): 1-29.
- [14] 吕正祥, 杨 星, 陈蜀喆, 等. 基于前景理论和 TOPSIS 的船舶航路选择决策方法[J]. 交通信息与安全, 2017, 35(6): 78-84.
- LYU Zhengxiang, YANG Xing, CHEN Shuzhe, et al. A decision method for route selection of ships based on prospect theory and TOPSIS [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2017, 35(6): 78-84. (in Chinese)
- [15] 张树凯, 杨家轩, 蔡 垚, 等. 基于 AIS 航迹和 Douglas-Peucker 算法的航线自动生成方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(6): 79-82.
- ZHANG Shukai, YANG Jiaxuan, CAI Yao, et al. Automatic routing method based on AIS tracks and Douglas-Peucker [J]. Journal of Chongqing Jiao Tong University (Natural Science), 2014, 33(6): 79-82. (in Chinese)
- [16] 张 丹, 胡 泊. 适用于道路沿线信息查询的矢量压缩算法[J]. 测绘通报, 2017(9): 60-64.
- ZHANG Dan, HU Bo. A vector compression algorithm for information searching on road polyline [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(9): 60-64. (in Chinese)
- [17] 黄道正. 水上交通事故的空间分布与后果评级研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- HUANG Daozheng. Study on spatial distribution and consequence classification of maritime traffic accidents [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [18] 刘 霞. 基于最大最小蚂蚁系统的动态车辆路径问题研究[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(1): 130-136.
- LIU Xia. A study of dynamic vehicle routing problems based on the maximum and minimum ant system [J]. Computer Engineering and Science, 2013, 35(1): 130-136. (in Chinese)